

令和元年5月30日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05960

研究課題名(和文) IPMモータ位置センサレスサーボ系の実現と適応形位置決め制御

研究課題名(英文) Adaptive Positioning Control System of Position Sensorless Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motors

研究代表者

長谷川 勝 (HASEGAWA, Masaru)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：70340198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、埋込磁石同期モータを対象とした適応型位置センサレスサーボ系の開発に取り組んだ。これを実現するには、位置推定の高速度化と位置制御系の適応化を同時に解決する必要があるが、ここでは、それぞれくし形フィルタと動的確定性等価原理に基づく方法を提案して解決にあたった。さらに、モータ停止を含む回転子位置推定時に発する騒音を低減する方法を検討した。本研究では位置指定用高周波重畳信号の注入波形を工夫することにより、騒音を低減させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、位置センサレス制御された埋込磁石同期モータの適用範囲をさらに拡大するために適応型位置センサレスサーボ系の実現に取り組んだ。学術的には、適応制御理論の一つである動的確定性等価原理を適用したことが特徴であり、これにより位置決め制御器に学習機構を搭載することができた。換言すると、負荷慣性の変動にロバストな制御系が構成できるため、事前にこの値を知る必要がなくなる点に有用性が生じる。本手法の応用としては、簡易な位置決め装置への適用が想定され、その具体例は多岐にわたると言える。

研究成果の概要(英文)：This study has tackled the realization of the adaptive positioning control of the position sensorless controlled interior permanent magnet synchronous motors. Both the quick position estimation performance and the adaptive position controller are simultaneously required for this purpose, which have been solved in this study based on the use of comb filters and Dynamic Certainty Equivalence principle in the adaptive control theory. Also we have successfully decreased the acoustic noise due to high frequency signal injection for the successful position estimation in standstill and extreme low speed region, which have been realized by the appropriately waveform modification of the high frequency signal.

研究分野：制御工学，モータドライブ，パワーエレクトロニクス

キーワード：埋込磁石同期モータ 位置センサレス 位置決め 動的確定性等価原理 くし形フィルタ 騒音低減

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 埋込磁石同期モータ(以下、IPM モータ)は高出力密度化と高効率化とが両立可能なモータであり、産業界、家電民生、車載用途として用いられる。また、システム全体の小形化、低コスト化を目的とした回転子位置センサレス制御系も実用化が進み、次なる課題は位置センサレス制御による位置制御系(位置サーボ)の実現である。これが実現できると、簡易位置決めを行う極めて多くの用途において、ドライブシステムの小形化と低コスト化が達成でき、IPM モータのさらなる適用範囲の拡大が可能となる。

(2) 一方、主研究者はこれまでの研究実績として、IPM モータに対する高速位置推定技術ならびに機械系ダイナミクスの学習機能を付加した適応型位置サーボ技術を有しており、これらの成果を融合することによって位置センサレスサーボ系に関する研究開発を行う着想を得たのも研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

(1) 本応募課題では、この IPM モータの位置センサレスサーボ系の実現と高性能化を図ることを主たる目的とした。運動方程式を含むモータの状態方程式において電圧から回転子位置までの相対次数が 3 となるため、旧来の適応制御理論に基づくパラメータ同定が理論的に不可能とされるシステムとなる。本研究では、この制約条件を緩和する動的確定性等価原理(DyCE 原理)を採用し、IPM モータの位置センサレス制御系に合った制御システムの実装法まで検討した。

(2) さらに、振動騒音の観点からも実用性を検討し、位置サーボ性能と低騒音化を両立する制御方法の構築も目的の一つとした。位置サーボ系に頻出する回転停止状態においては、回転子位置を推定するために高周波電圧信号を重畳する必要がある。ただし、この重畳信号は制御には本来不必要な信号であり、振動騒音の原因となる。したがって、制御性能と低騒音化性能は互いにトレードオフの関係にあり、本研究では高いレベルでの両立を目指した。

3. 研究の方法

(1) まず、位置推定性能のさらなる高速化を図った。供試機として一般に流通している 750W の IPM モータ(突極比 30%程度)を、制御装置として IGBT を用いた PWM インバータと TI 社製 DSP(TMS320C6701)利用し、高周波パルス電圧重畳とくし形フィルタを用いた位置推定法の実現とその性能評価を行った。

(2) 次に、相対次数が 3 となる制御対象に対して直接形適応制御に基づく制御器パラメータの自律学習制御系の実現とその性能評価、手法の改善を継続的に行った。この際、動的確定性等価原理に基づいて学習制御系の安定化を図ったが、パラメータ同定値の 2 階微分値が必要となったため、帯域制限付き微分演算器を新たに提案し、その効果を評価した。

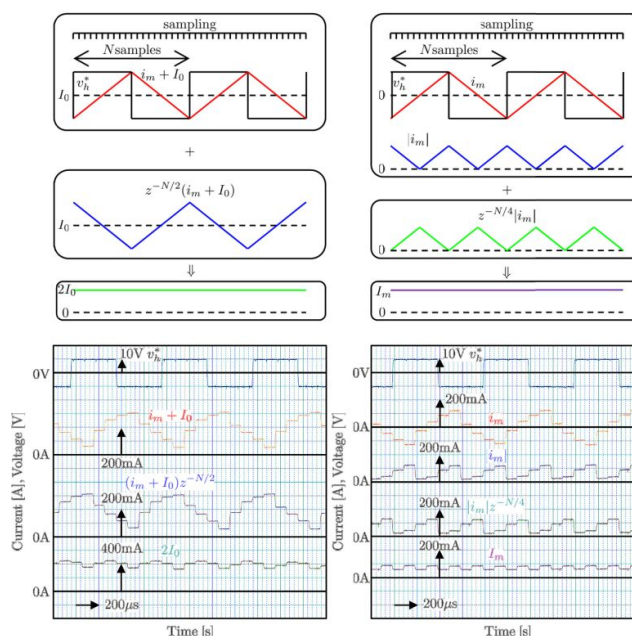
(3) 上記を融合し、位置センサレス制御系における位置サーボ系の実現を図り、その性能評価を行った。その際、位置推定の応答性能と制御器パラメータの自律学習制御系の収束性能とのバランスが重要となることが判明し、その調整を行った。

(4) 上記(3)の制御系において、位置推定を行う際に必要となる高周波パルス電圧波形に起因してやや耳障りな騒音が確認された。このため、騒音計による可聴音の測定を行った。さらに、この騒音のスペクトルを分散して低騒音化を図るため、高周波パルス電圧波形の工夫を行った。

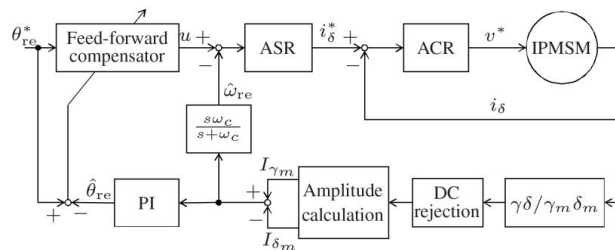
4. 研究成果

(1) 位置センサレスサーボ系においては、回転子推定位置をフィードバックするため、一定の応答性能が求められる。本研究では先行研究にて開発済みであった回転子位置推定性能のさらなる高性能化を図った。この過程を示す実験結果を右図に示す。この結果は、検出電流に含まれる高周波信号のみを取り出すために、2 段のくし形フィルタによって周波数弁別して得たものであるが、位置推定の高速化を図るため、実際には重畳周波数、振幅などの調整を行っている。

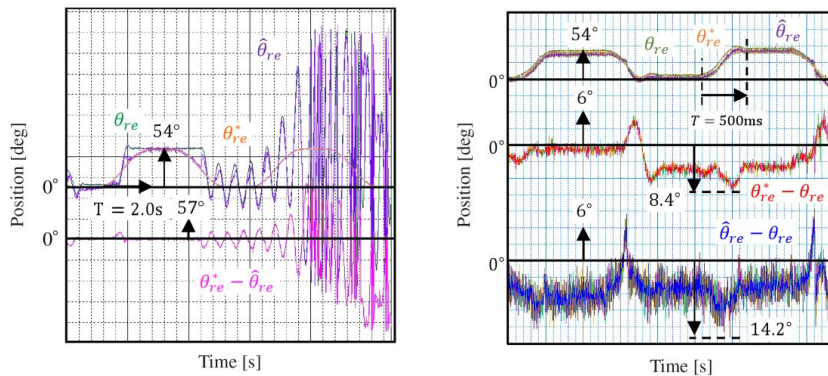
(2) 次に、位置制御側の性能改善を図った。本研究では、位置制御器として、次ページに示す適応フィードフォワード補償器を採用した。この制御系は位置制御誤差が収束するまで制御器ゲインを学習し続ける手法であり、学習制御形の安定性が保証される限り位置制御性能の高性能化が保証され



る。この学習制御系の安定性を確保するため、本研究では動的確定性等価原理(DyCE 原理)に基づいて学習制御系の安定化を図った。ただし、その際にパラメータ同定値の2階微分値が必要となったため、帯域制限付き微分演算器を新たに提案し、その効果を評価した。

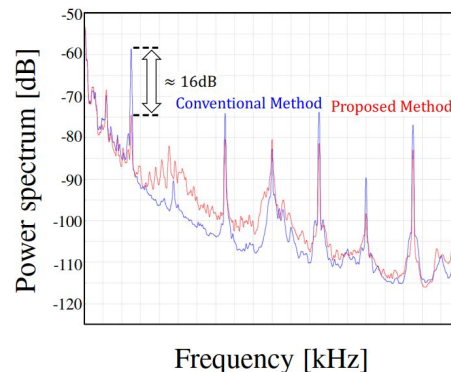


(3) 上記の 2 手法を同時に実装し、位置センサレスサーボ系を実現した。下図にその位置センサレス時の位置制御結果の一例を示す。同左図は動的確定性等価原理を適用しないもの、同右



図は提案した動的確定性等価原理を適用したものである。これらの比較より、安定な位置サーボ系の実現に成功していることがわかる。右図において、位置推定誤差、位置制御誤差が残存しているが、この改善は今後の課題としたい。

(4) 最後に制御時に発生する騒音の評価を行った。この原因は位置推定のために必要となる高周波電圧信号の重畳に起因することは自明の事実であり、本研究ではその重畳波形の調整を行った。具体的には 信号重畳の振幅を動的に変化させる方法、ならびに信号重畳の休止期間を定期的に挿入する方法を開発した。騒音計による測定結果から、位置センサレスにおける位置制御性能を維持しつつ、重畳信号の基本周波数に一致する成分の騒音を大きく低減し、-16dB の効果を得た。



5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) Naoki Kawamura, Masaru Hasegawa, Kang-Zhi Liu, Tadanao Zanma : "Position-sensorless adaptive positioning control system for IPMSMs", IET Electric Power Applications, Volume 13, Issue 2, pp.138-146, 査読有, 2019, DOI:10.1049/iet-epa.2018.5315
- (2) K.Tanaka, M.Hasegawa, A.Matsumoto : "PMSM Sensorless Control Based on Position Estimation Correction Using All Pass Filters", Electrical Engineering in Japan, Volume 199, pp. 55-64, 査読無, 2017, <http://doi.wiley.com/10.1002/eej.22945>
- (3) Yousuke Nakayama, Atsushi Matsumoto, Masaru Hasegawa: "Position sensorless control system within over-modulation range based on mathematical model robust to magnetic saturation of IPMSMs", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 6, No. 1, pp.36-45, 査読有, 2017, <http://doi.org/10.1541/ieejjia.6.36>
- (4) 田中賢一郎, 長谷川勝, 松本純 : 「オールパスフィルタを用いた位置推定補正法に基づく PMSM 位置センサレス制御」, 電気学会産業応用部門論文誌, 136 巻, 3 号, pp. 238-245, 査読有, 2016, <https://doi.org/10.1541/ieejias.136.238>
- (5) Toshiki Suzuki, Masaru Hasegawa, Mutuwo Tomita, and Shinji Doki : "Initial Position Estimation for IPMSMs Using Comb Filters and Effects on Various Injected Signal Frequencies", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4, No. 3, pp. 204-211, 査読有, 2015, <http://doi.org/10.1541/ieejjia.4.204>
- (6) 松本純, 長谷川勝, 道木慎二 : 「最大トルク制御に適した磁束モデルに基づく IPMSM の位置センサレス弱め磁束制御」, 電気学会産業応用部門論文誌, 135 巻 6 号, pp.662-670, 査読有, 2015, <http://doi.org/10.1541/ieejias.135.662>

[学会発表] (計 29 件)

- (1) 河村尚輝, 劉康志, 残間忠直, 長谷川勝: 「DyCE 原理に基づく適応位置センサレスサーボシステムのための直流外乱補償法」, 電気学会 モータドライブ / 家電民生合同研究会, 2019

- (2) 大月康平, 長谷川勝:「高回転 PMSM 位置センサレス制御のための APF/DyCE 原理を用いた適応磁束オブザーバの性能改善」, 電気学会 モータドライブ/家電民生合同研究会, 2019
- (3) 岩堀巧夢, 河村尚輝, 劉康志, 残間忠直, 長谷川勝:「DyCE 原理に基づく誘導電動機の低速・回生領域における速度センサレス制御の安定化」, 電気学会全国大会, 2019
- (4) Naoki Kawamura, Masaru Hasegawa: “Suppression of Acoustic Noise of Position Sensorless Adaptive Positioning Servo System Based on DyCE Principle”, Proc. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 査読有, 2018
- (5) 河村尚輝, 長谷川勝, 劉康志, 残間忠直:「重畳周波数分散による信号重畳法を利用した DyCE 原理に基づく適応位置センサレスサーボシステムの低騒音化」, 電気学会産業応用部門大会, 2018
- (6) 河村尚輝, 劉康志, 残間忠直, 長谷川勝:「DyCE 原理に基づく適応二次磁束オブザーバによる誘導電動機の一次抵抗同定」, 電気学会 マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会, 2018
- (7) 河村尚輝, 長谷川勝:「DyCE 原理に基づく適応位置センサレスサーボシステムに適した騒音抑制のための信号重畳法」, 電気学会産業応用部門研究会, 2018
- (8) N.Kawamura, M.Hasegawa : “Position Sensorless Adaptive Positioning Servo System Based on DyCE Principle with Adaptive Control Input Synthesis Using Convolutional Integration for Differential Calculation”, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 査読有, 2017
- (9) 河村尚輝, 長谷川勝:「畳込積分による近似微分法を利用した制御入力生成を用いた DyCE 原理に基づく適応位置センサレスサーボシステム」, 電気学会産業応用部門大会, 2017
- (10) 長谷川勝, 田中賢一郎:「モータ制御の技術革新によるモータドライブの新展開 2 - 磁極位置センサと電流センサレス制御」, 電気学会産業応用部門大会, 2017
- (11) 河村尚輝, 長谷川勝:「埋込磁石同期電動機の適応位置センサレスサーボシステムのための位置センサレス制御系の低騒音化」, 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 2017
- (12) 大月康平, 長谷川勝:「DyCE 原理と回転変換を用いた適応磁束オブザーバによる IPMSM 位置センサレス制御の低速域性能改善」, 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 2017
- (13) 大月康平, 長谷川勝:「DyCE 原理に基づく適応磁束オブザーバを用いた IPMSM 位置センサレス制御の性能改善」, 電気学会産業応用部門大会, 2017
- (14) 大月康平, 長谷川勝:「IPMSM 位置センサレス制御のための DyCE 原理に基づく適応磁束オブザーバ」, 電気学会産業応用部門モータドライブ研究会, 2017
- (15) 河村尚輝, 長谷川勝:「DyCE 原理に基づく適応位置サーボ系における畳込積分による近似微分法を利用した制御入力生成法」, 電気学会産業応用部門モータドライブ研究会, 2016
- (16) 河村尚輝, 長谷川勝:「パラメータの二階微分項を考慮した DyCE 原理に基づく埋込磁石同期電動機の適応位置サーボシステムの高精度化」, 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 2016
- (17) 御宿裕也, 長谷川勝:「小形表面磁石同期電動機の回転子位置推定における極性判別法」, 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 2016
- (18) 御宿裕也, 長谷川勝:「小形表面磁石同期電動機の簡易初期位置推定」, 電気学会産業応用部門大会, 2016
- (19) 河村尚輝, 長谷川勝:「DyCE 原理に基づく埋込磁石同期電動機の適応位置センサレスサーボシステムの高応答化」, 電気学会産業応用部門大会, 2016
- (20) 鈴木俊毅, 道木慎二, 長谷川勝:「IPMSM の低速域位置センサレス制御におけるインバータスイッチングモードの影響についての検討」, 電気学会産業応用部門モータドライブ研究会, 2016
- (21) Naoki Kawamura, Masaru Hasegawa : “Adaptive Positioning System Based on DyCE Principle Using Position Sensorless Controlled IPMSMs with High Performance Position Estimation”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 査読有, 2016
- (22) Ken-ichiro Tanaka, Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa : “Extremely Precise Position Estimation in Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors Using All-pass Filters and Band-pass Filters”, IEEE International Conference on Industrial Technology, 査読有, 2016
- (23) 河村尚輝, 長谷川勝:「埋込磁石同期電動機の DyCE 原理に基づく適応位置サーボシステムとセンサレスサーボへの適用」, 電気学会 MD/HCA 研究会, 2016
- (24) Toshiki Suzuki, Shinji Doki and Masaru Hasegawa: “Evaluation of Direct Position Estimation based on - Axes Inductance Information for IPMSM Sensorless Control Systems”, Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 査読有, 2015
- (25) Yousuke Nakayama, Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa: “Improvement in Current Control Performance for IPMSMs in the Inverter Over-modulation Range Considering Voltage Saturation”, IEEE International Future Energy Electronics

Conference, 査読有, 2015

- (26) 河村尚輝, 長谷川勝, 松本純:「埋込磁石同期電動機のセンサレスサーボのための DyCE 原理に基づく適応位置サーボシステムの一構成法」, 電気・電子・情報関係学会 東海支部 連合大会, 2015
- (27) Yousuke Nakayama, Atsushi Matsumoto and Masaru Hasegawa: “Robust Position Sensorless control Method of IPMSMs to Magnetic Non-linearity within Over-modulation Range”, European Conference on Power Electronics and Applications, 査読有, 2015
- (28) Toshiki Suzuki, Shinji Doki and Masaru Hasegawa: “Improvement in Response of Position Estimation for IPMSMs in Low-speed Regions Including Standstill Using Area Calculation”, European Conference on Power Electronics and Applications, 査読有, 2015
- (29) Ken-ichiro Tanaka, Masaru Hasegawa and Atsushi Matsumoto: “Extremely Precise Position Estimation in Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors Using All-pass Filter”, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 査読有, 2015

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：松本 純

ローマ字氏名：(MATSUMOTO, Atsushi)

所属研究機関名：中部大学

部局名：工学部

職名：助教

研究者番号(8桁): 50736072

(2)研究協力者

研究協力者氏名：なし

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。